

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ
И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

УДК 669.25'779:537.622.4

АНАЛИЗ ФАЗОВОГО СОСТАВА ПОРОШКОВ СПЛАВА Co–P
НА ОСНОВЕ МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

© 2013 г. Л. А. Чеканова*, Е. А. Денисова*, О. А. Гончарова**,
С. В. Комогорцев*, ***, Р. С. Исхаков*, ***

*Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, 660036 Красноярск, Академгородок, 50, стр. 38

**Сибирский федеральный университет, 660041 Красноярск, пр. Свободный, 79

***Сибирский государственный технологический университет, 660049, Красноярск, пр. Мира, 82

e-mail: rauf@iph.krasn.ru

Поступила в редакцию 21.02.2012 г.;
в окончательном варианте – 28.08.2012 г.

Предложен новый метод количественной оценки фазового состава многофазного ферромагнитного сплава, основанный на измерениях зависимостей намагниченности от температуры и внешнего поля. Проведена характеристика фазового состава ультрадисперсных порошков Co–P. Построены фазовые диаграммы неравновесных твердых растворов Co–P в координатах размер частиц – концентрация фосфора.

Ключевые слова: фазовый анализ, многофазные сплавы, характеристика материалов, магнитные сплавы.

DOI: 10.7868/S0015323013020046

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важных методов анализа гетерофазных ферромагнитных сплавов является метод магнитофазового анализа [1–6]. В данном методе регистрация фазового состава проводится по зависимости $M(T)$. За характеристику фазы выбирается значение ее температуры Кюри и намагниченность насыщения M_s . В основе метода лежит предположение, что, согласно закону аддитивности, высокотемпературная часть $M(T)$ может быть разложена на парциальные кривые

$$M(T) = \sum p_i M_i(T), \quad (1)$$

где p_i и $M_i(T)$ – объемная доля и намагниченность i -й фазы.

В случае порошков неравновесных сплавов традиционный магнитный фазовый анализ не применим, так как необратимые превращения начинаются при температурах значительно меньших температуры Кюри. В данной работе на примере исследования порошков неравновесных аморфных и нанокристаллических сплавов Co–P мы демонстрируем модификацию метода магнитного фазового анализа, позволяющую преодолеть указанную трудность.

Для массивных образцов чистого кобальта известны две полиморфные модификации: α -Co с гексагональной плотноупакованной решеткой (ГПУ) при температуре ниже 427°C и β -Co с кубической

гранцентрированной решеткой (ГЦК) при температуре выше 427°C. В равновесных сплавах Co–P при содержании фосфора ниже 33 ат. % реализуется состояние механической смеси двух фаз Co + Co₂P [7]. В работах [8–20] показано, что в сплавах Co–P, изготавливаемых методом химического либо электрохимического осаждения, при комнатной температуре могут быть получены фазы неравновесных твердых растворов с ГПУ-, ГЦК-структурой, а также Co–P в аморфном состоянии.

Исследования атомной структуры сплавов Co–P, получаемых в виде покрытий (толщина 30 мкм) методами химического и электрохимического осаждения, показали, что при изменении концентрации фосфора в сплавах Co–P в пределах 0–15 ат. % происходит 2 структурных превращения. Так, при содержании фосфора менее 5 ат. % в покрытиях Co–P сплава реализуется ГПУ-структура, при содержании фосфора от 5 до 9 ат. % сплав характеризуется ГЦК-структурой, а в области концентраций фосфора более 9 ат. % сплав находится в аморфном состоянии [9, 10].

Структура и магнитные свойства высокодисперсных порошков сплава Co–P, полученных методом химического осаждения, исследовались ранее в работах [8, 11, 12]. Информация о структуре, полученная методом рентгеновской дифракции, оказалась неоднозначной. Так, на рентгеновских дифрактограммах порошков с концен-

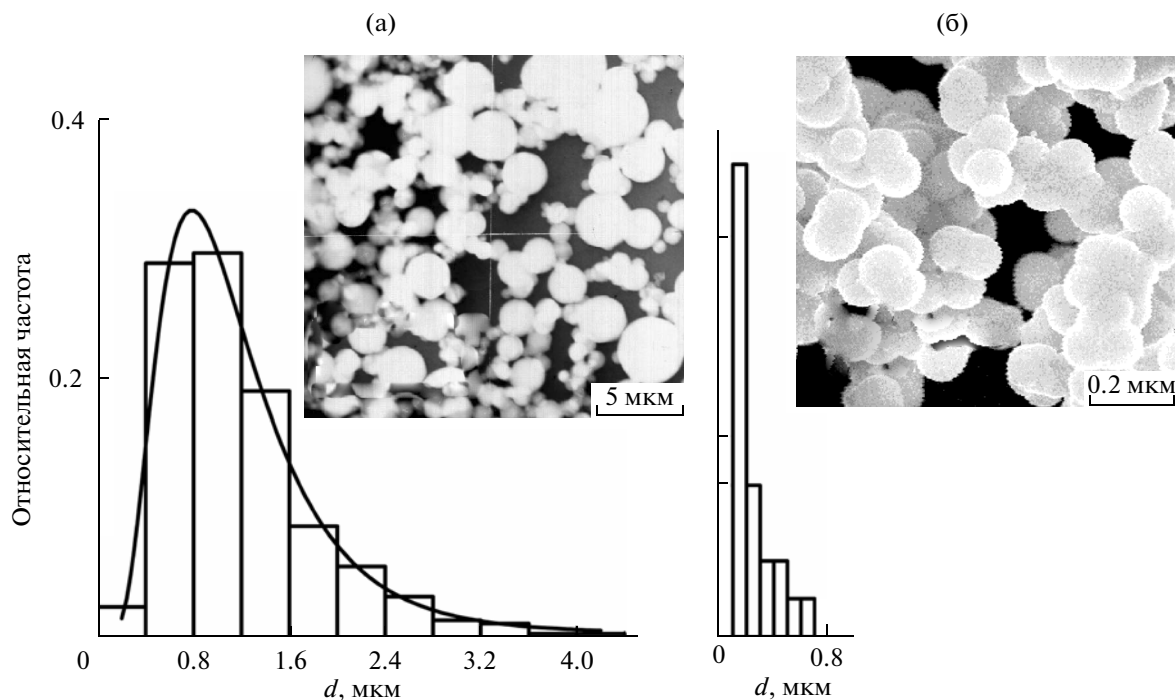


Рис. 1. Гистограммы распределения частиц по размерам на примере порошков состава $\text{Co}_{88}\text{P}_{12}$: а – исходный образец; б – фракция со средним размером частиц 0.1 мкм.

трацией фосфора менее 9 ат. % фиксируются рефлексы ГПУ-фазы, при высоком содержании фосфора (>12 ат. %) наблюдается только характерное для аморфной фазы гало. В промежуточной области концентраций фосфора от 9 до 12 ат. % на дифрактограммах наблюдаются сильно уширенные рефлексы ГПУ-фазы на фоне аморфного гало. Дифрактограммы такого рода являются следствием нанокристаллического состояния частиц этих порошков и не позволяют однозначно судить об их фазовом составе. Исследования спектров ЯМР на данных порошках показали, что частицы этих порошков в том числе содержат атомы Со с ГЦК-ближайшим окружением [13, 21]. Таким образом, фазовый состав порошков в этой области концентраций фосфора качественно может быть охарактеризован как $\alpha\text{-Co-P}$ (ГПУ) + $\beta\text{-Co-P}$ (ГЦК) + аморфный Со–Р.

Задачей данной работы является количественная оценка объемного содержания фаз в высокодисперсных порошках Со–Р, в которых концентрация фосфора меняется от 0 до 18 ат. %, а размеры частиц – от 0.1 до 3 мкм, с помощью методов магнитофазового анализа.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Порошки Со–Р сплавов с размерами частиц от 0.1 до 3 мкм были получены методом химического осаждения из водных растворов солей Со, в качестве восстановителя использовался гипофосфит

натрия (NaH_2PO_2). Концентрация фосфора в сплаве Со–Р определялась методом химического анализа. Порошки далее были рассортированы по среднему размеру частиц на шесть фракций (0.1; 0.4; 0.6; 0.8; 2 и 3 мкм) для каждой концентрации фосфора в сплаве. Размеры частиц находились из обработки электронно-микроскопических изображений, полученных на электронном микроскопе JEM-100С (строилась гистограмма, по которой определялись средний размер частиц, его наиболее вероятная величина и дисперсия). Магнитные измерения выполнены на вибрационном магнитометре в области полей от 0 до 14 кЭ в диапазоне температур от 78 до 300 К.

Порошки имели форму, близкую к сферической. Распределение частиц порошка $\text{Co}_{88}\text{P}_{12}$ по размерам представлено на рис. 1. Распределение частиц по размеру подчиняется логнормальному

закону $f_X(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln x - \ln x_0)^2}{2\sigma^2}\right)$ со средним квадратическим отклонением $\sigma = 0.53$ и $x_0 = 1.04$ мкм.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Измерения зависимостей намагниченности от температуры показали, что в области низких температур намагниченность насыщения M_s высоко-

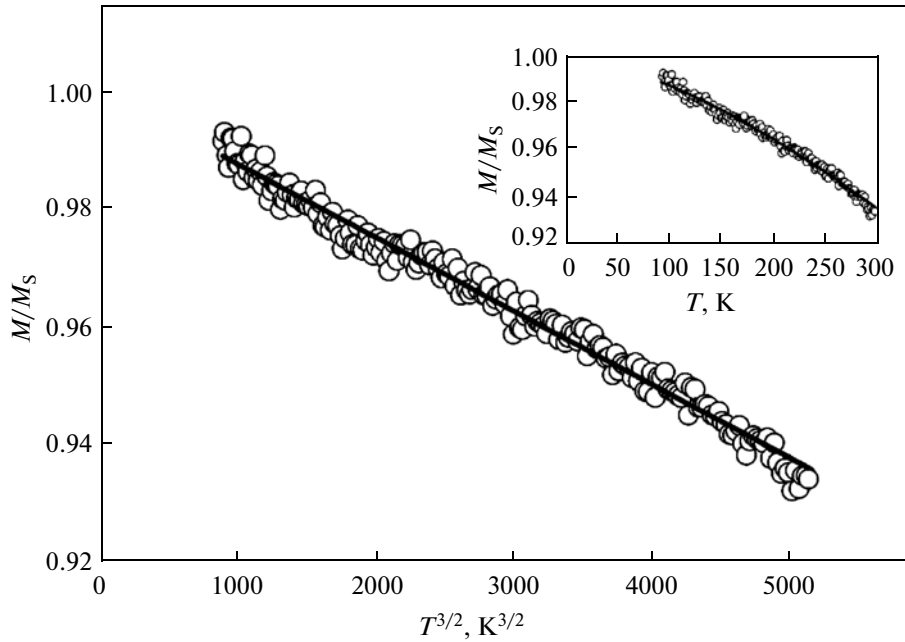


Рис. 2. Зависимость намагниченности насыщения M_S высокодисперсных порошков Co–P от температуры.

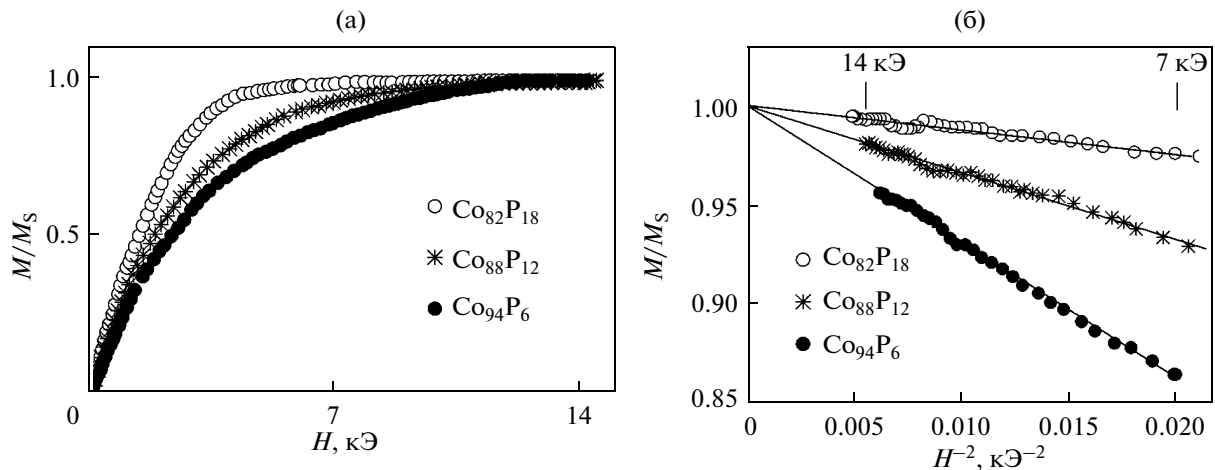


Рис. 3. Приближение намагниченности к насыщению в высокодисперсных порошках Co–P.

дисперсных порошков Co–P следует закону Блоха $T^{3/2}$, характерному для ферромагнетиков (рис. 2):

$$M(T) = M_0 \left(1 - BT^{3/2}\right). \quad (2)$$

Измерение намагниченности при различных температурах для каждой фракции (размер частиц) и каждой концентрации фосфора исследуемого порошка, таким образом, позволяет из аппроксимации экспериментальных данных формулой (2) определить величину константы Блоха B (см. таблицу) как функцию концентрации P и размера частиц. Погрешность вычисления константы Блоха B составила 1%.

Приближение намагниченности к насыщению в высокодисперсных порошках Co–P следует закону Акулова (рис. 3):

$$M(H) = M_S \left(1 - (aH_a/H)^2\right). \quad (3)$$

Это позволило рассчитать для высокодисперсных порошков величины намагниченности насыщения M_S и среднеквадратичной флуктуации поля локальной магнитной анизотропии aH_a . Здесь $H_a = 2K/M_S$, K – энергия локальной магнитной анизотропии частиц Co–P, a – симметричный коэффициент, равный $(1/15)^{1/2}$ для одноосной магнитной анизотропии (ГПУ) и $(2/105)^{1/2}$ для кубиче-

Константа Блоха B ; среднеквадратическая флуктуация поля локальной магнитной анизотропии aH_a в порошках сплава Co–P и объемные доли $x_{ГПУ}$, $x_{ГЦК}$, x_A , рассчитанные из системы уравнений (6)

Средний размер частиц порошка d , мкм	Концентрация фосфора, ат. %	Поле локальной анизотропии aH_a , кЭ	Константа Блоха B , $\times 10^{-6} \text{ К}^{-3/2}$	$x_{ГПУ}$	$x_{ГЦК}$	x_A
3	6	2.6	5.4	0.48	0.32	0.20
	12	1.77	11.2	0.19	0.29	0.52
	15	1.25	13.2	0.06	0.30	0.64
2	18	1.23	16	0.05	0.16	0.79
	6	2.75	4.8	0.65	0.19	0.16
	10	3.01	6.9	0.17	0.53	0.30
	12	1.67	9.9	0.24	0.31	0.45
0.8	15	1.95	15.5	0.06	0.18	0.76
	6	3.25	2.28	0.77	0.21	0.02
	10	1.52	7.1	0.14	0.55	0.31
	12	1.84	7.2	0.22	0.47	0.31
0.6	15	1.11	16	0.03	0.18	0.79
	18	1.12	18.3	0.02	0.07	0.91
	6	3.46	2.04	0.87	0.12	0.01
	10	1.42	8.7	0.11	0.49	0.40
	12	1.92	5.4	0.25	0.54	0.21
0.4	15	1.01	16.8	0.01	0.16	0.83
	18	1.06	18.4	0.01	0.07	0.92
	6	2.3	2.3	0.94	0.04	0.02
	12	3.6	5.2	0.54	0.27	0.19
0.1	15	2.77	17.6	0.05	0.08	0.87
	18	1.23	19	0.03	0.02	0.95
	6	2.86	2.14	0.59	0.38	0.03
	10	1.55	8.4	0.14	0.48	0.38
	12	2.08	5.2	0.30	0.50	0.20
	15	1.2	18.5	0.04	0.04	0.92
	18.5	1.14	19	0.02	0.03	0.95

ской магнитной анизотропии (ГЦК) [10]. Погрешность вычисления величины aH_a составляет 1%.

Суть примененного нами метода количественного анализа фазового состава состоит в следующем. Для порошков гетерофазных сплавов намагниченность, определяемая в магнитометрическом эксперименте, аддитивно усредняется как для измерений зависимости намагниченности насыщения от температуры, так и для измерений зависимости намагниченности от напряженности магнитного поля, приводя к эффективному усреднению измеряемых величин B в (2) и aH_a в (3):

$$M(T) = M_1(T)x_{ГПУ} + M_2(T)x_{ГЦК} + M_3(T)x_A = M_{0,эф}(1 - B_{эф}T^{3/2}); \quad (4)$$

$$M(H) = M_1(H)x_{ГПУ} + M_2(H)x_{ГЦК} + M_3(H)x_A = M_{0,эф}(1 - (aH_{a,эф}/H)^2), \quad (5)$$

где x_i – объемные доли соответствующих фаз.

Отсюда (формулы (4)–(5)), можно записать систему уравнений:

$$\begin{cases} x_{ГПУ} + x_{ГЦК} + x_A = 1 \\ B_1x_{ГПУ} + B_2x_{ГЦК} + B_3x_A = B_{эф} \\ (a_1H_{a1})^2 x_{ГПУ} + (a_2H_{a2})^2 x_{ГЦК} + (a_3H_{a3})^2 x_A = (aH_{a,эф})^2. \end{cases} \quad (6)$$

Таким образом, усредненные величины $B_{эф}$ и $aH_{a,эф}$, определенные из магнитометрических измерений, оказываются в правой части второго и третьего уравнений системы (6). Решая систему уравнений (6) относительно $x_{ГПУ}$, $x_{ГЦК}$, x_A , можно определить объемные доли ГПУ, ГЦК и аморфной фаз для исследованных порошков Co–P. Провести такую оценку можно, зная параметры чистых фаз, т.е. коэффициенты a_1H_{a1} , a_2H_{a2} , a_3H_{a3} ; B_1 , B_2 , B_3 .

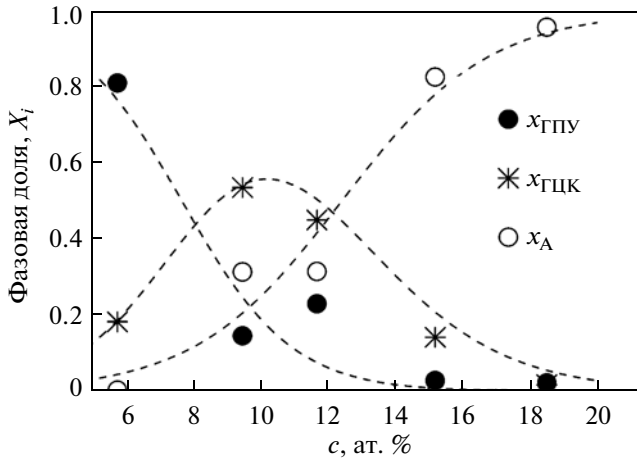


Рис. 4. Зависимости долей фаз от концентрации фосфора $c(P)$ (размер частиц 0.8 мкм).

Выбор проводили так. Исследования покрытий Co–P показали, что однофазные твердые растворы Co–P (ГПУ, ГЦК) характеризуются практически независимыми от состава определенными величинами константы Блоха B_i [9] и поля локальной анизотропии $a_i H_{ai}$ [10].

Для нашего расчета мы приняли коэффициенты $a_1 H_{a1}$, $a_3 H_{a3}$; B_1 , B_3 равными величинам этих коэффициентов для порошков, соответствующим границам исследуемого диапазона концентраций фосфора (6 ат. % для $a_1 H_{a1}$ и B_1 , 18 ат. % для $a_3 H_{a3}$ и B_3). Причинами такого выбора являются: наличие четкой дифракционной картины для образцов с концентрацией фосфора 6 ат. % (соответствующей только ГПУ фазе); регистрация только аморфного гало для порошков с концентрацией фосфора 18 ат. %. Выбранные таким образом реперные величины коэффициентов в уравнении (6) хорошо согласуются с величинами аналогичных параметров aH_a и B для ГПУ- и аморфной фазы, измеренных на покрытиях Co–P [9, 10]. Величины $a_2 H_{a2}$, B_2 мы выбрали пропорциональными величинам аналогичных параметров в однофазных покрытиях Co–P с ГЦК-структурой [9, 10]. Для ГПУ-фазы порошков (концентрация фосфора $c < 6$ ат. %) эти величины равны: $B_1 = 2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-3/2}$, $a_1 H_{a1} = 3.7 \text{ кЭ}$; для порошков с ГЦК-структурой (концентрация фосфора $6 \text{ ат. \%} < c < 8 \text{ ат. \%}$): $B_2 = 1.17 \times 10^{-6} \text{ K}^{-3/2}$, $a_2 H_{a2} = 0.41 \text{ кЭ}$; для аморфных порошков (концентрация фосфора $c > 15$ ат. %): $B_3 = 20 \times 10^{-6} \text{ K}^{-3/2}$, $a_3 H_{a3} = 1 \text{ кЭ}$.

Выбор величин B_3 и $a_3 H_{a3}$ независимыми от концентрации фосфора для аморфной фазы обусловлен следующими соображениями. Константа Блоха в переходной области концентраций фосфора от 15 до 18 ат. % практически не изменяется (см. таблицу). Наиболее ярко это проявляется для порошков с

меньшим размером частиц (0.1–0.6 мкм), по-видимому, характеризующихся большей однородностью состава. Величина константы Блоха в ферромагнетиках непосредственно определяется величиной константы обменного взаимодействия, связанной, в свою очередь, с ближним порядком атомной структуры. Ввиду этого независимость константы Блоха в порошках переходной области концентраций фосфора от 15 до 18 ат. % объясняется тем, что образуется двухфазная смесь: аморфный твердый раствор Co–P постоянного состава + кристаллический фосфид Co_2P [7].

Результаты расчетов объемных долей $x_{ГПУ}$, $x_{ГЦК}$, x_A из уравнений (6) показали, что для порошков одного размера характер изменения фазового состава от концентрации фосфора качественно подобен. При содержании фосфора менее 6 ат. % содержание ГПУ-фазы близко к 100%. Основу порошков с содержанием фосфора выше 12 ат. % составляет аморфная фаза. В промежуточном диапазоне содержания фосфора в порошках реализуется гетерофазное состояние со сравнимыми долями ГЦК, ГПУ и аморфной фаз (см. таблицу). Погрешность вычисления долей фаз x_i составила 10^{-2} – 10^{-3} (2–3%).

Мы аппроксимировали зависимости объемных долей фаз ГПУ и ГЦК X_i от концентрации фосфора c логистической функцией $X_i(c)$ (штриховые линии на рис. 4):

$$X_i(c) = (1 + \exp(k_i(c - c_0)))^{-1}. \quad (7)$$

Используя полученные зависимости $X(c)$, мы построили контурные диаграммы в координатах содержание фосфора c –доля i -ой фазы X_i –средний размер частиц d (рис. 5). На рис. 5 приведены линии одинакового фазового состава (соответствующие условию $X(c) = \text{const}$), построенные для порошков с различным размером частиц в координатах (c, d) . Анализ полученных функций $X(c)$ показал, что характерные величины концентраций фосфора, соответствующие определенной стадии фазовых превращений в исследуемом сплаве, зависят от размера частиц порошка (d).

Представленные на рис. 5 фазовые диаграммы позволяют дать логическое объяснение полученным ранее в работах [8, 12] экспериментальным зависимостям поля локальной магнитной анизотропии aH_a для аморфных и кристаллических порошков Co–P от размера частиц (рис. 6). Для порошков с концентрацией фосфора $c < 9$ ат. % зависимость $aH_a(d)$ представляет собой выпуклые кривые с максимальной величиной aH_a при $d = 0.8$ мкм, а для порошков с концентрацией фосфора $c > 15$ ат. % – вогнутую кривую с минимальной величиной aH_a также при $d = 0.8$ мкм. Такое anomальное поведение зависимостей $aH_a(d)$ теперь может быть объяснено на основе изменения фазового состава в порошках

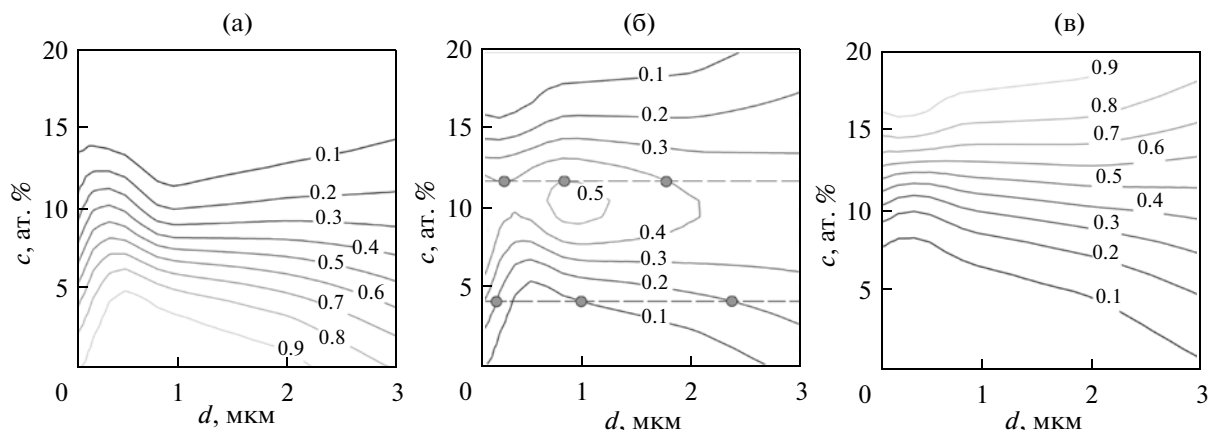


Рис. 5. Графическое представление объемного содержания ГПУ (а), ГЦК (б) и аморфной (в) фаз с помощью аппроксимирующих функций $x(c)$. Для аморфной и ГПУ-фаз линии соответствуют одинаковому фазовому составу, для ГЦК-фазы объемная доля рассчитана из условия $x_{\text{ГЦК}}(c) = 1 - x_{\text{ГПУ}}(c) - x_{\text{А}}(c)$.

сплавов Co–P (представлено на рис. 5). Дело в том, что из трех фаз (ГПУ, ГЦК, аморфная), составляющих материал порошков Co–P, ГЦК-фаза является наиболее магнитомягкой, а именно характеризуется наименьшими величинами H_a . В то же время изменение величины aH_a на рис. 6 может быть сопоставлено с изменением фазового состава порошка (рис. 5) с постоянным содержанием фосфора при изменении размера частиц d .

Для примера рассмотрим диаграмму, представленную на рис. 5б. Горизонтальное сечение, проведенное на уровне $c = 4$ ат. %, с ростом d пересекает линии постоянного фазового состава ГЦК-фазы в последовательности 0.2–0.1–0.2 (серые символы на рис. 5б). Очевидно, что достижение минимального содержания ГЦК-фазы в области $d \sim 0.3–1$ мкм будет соответствовать максимальной средней величине aH_a , что и наблюдается на рис. 6. Горизонтальное же сечение на рис. 5б, проведенное на уровне $c = 12$ ат. %, с ростом d пересекает линии постоянного фазового состава ГЦК-фазы в последовательности 0.4–0.5–0.4 (серые символы на рис. 5б). Здесь максимальное содержание ГЦК-фазы достигается вблизи $d \sim 1$ мкм, приводя к минимальному среднему значению aH_a , что также согласуется с рис. 6 (аморфные порошки).

Причиной зависимости величин концентраций фосфора, соответствующих линиям постоянного фазового состава на рис. 5, от размера частиц d может являться лапласово давление, связанное с кривизной поверхности частиц. Для анализа этого предположения мы представили фазовую диаграмму в координатах $(c, 1/d)$ (рис. 7). Нижняя и верхняя линии на рис. 7 соответствуют подгонным параметрам c_0 для ГПУ- и аморфной фаз соответственно, полученным при аппроксима-

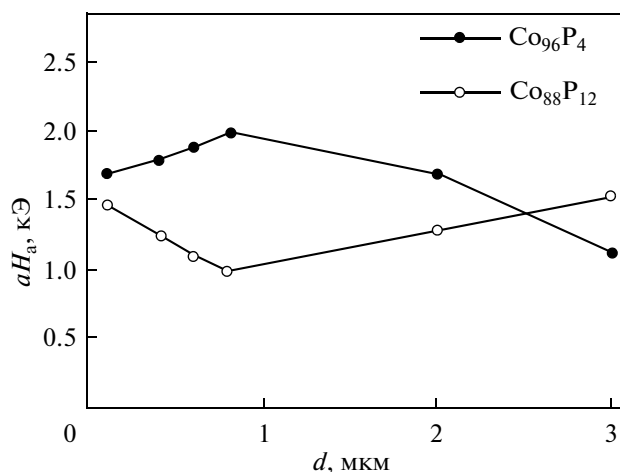


Рис. 6. Зависимость поля локальной анизотропии от среднего диаметра частиц порошка Co–P согласно работе [8].

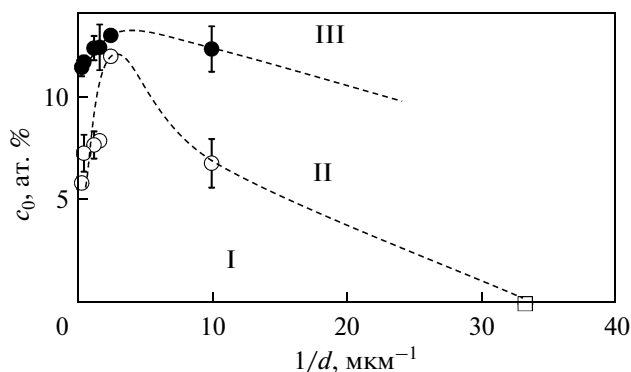


Рис. 7. Зависимости характерных концентраций c_0 от средних размеров частиц в порошках Co–P. Сплошные черные символы – параметры c_0 из уравнения (7) для аморфной фазы; пустые круглые символы – то же для ГПУ-фазы; пустой квадрат – данные работы [22].

ции экспериментальных данных функцией (7). Таким образом, в области I на рис. 7 преобладает ГПУ-фаза (ее содержание более 50%), в области III преобладает аморфная фаза (более 50%), в области II приблизительно в равных количествах сосуществуют ГПУ-, ГЦК- и аморфная фаза. На этой диаграмме также приведена точка с координатами $(0, 1/d^*)$, соответствующая характерному размеру для наночастиц чистого кобальта (d^*), ниже которого, вследствие лапласова давления, для частиц Co при комнатной температуре становится стабильной ГЦК-структура [22, 23].

Лапласово давление, связанное с внешней поверхностью сферических частиц, $\sim 1/d$, на наш взгляд, качественно объясняет уменьшение $c_0(1/d)$ для частиц с размерами $d < 0.4$ мкм, так как на рис. 7 точка, соответствующая порошку с размером частиц 0.1 мкм, лежит на ниспадающей части кривой, разделяющей области I и II наряду с точкой из работы [22]. Рост кривых, разделяющих области I, II и III, для частиц с размерами $d > 0.4$ мкм на рис. 7 не может быть объяснен на основе представлений о лапласовом давлении, связанном с внешней поверхностью частиц, так как предполагает, что здесь мы должны иметь дело с поверхностной энергией противоположного знака в сравнении с поверхностной энергией границы раздела кобальт–воздух. Мы считаем, что этот рост $c_0(1/d)$ может быть связан с влиянием внутреннего давления, возникающего за счет избыточной энергии границ зерен между кристаллитами, из которых состоят частицы исследуемых порошков.

Следует также отметить, что полученные фазовые диаграммы для порошков Co–P являются метастабильными диаграммами фазового равновесия, так как характеризуют состояние равновесия метастабильных твердых растворов Co–P.

Использованный в работе метод количественной оценки фазового состава многофазного ферромагнитного сплава, основанный на измерениях зависимостей намагниченности от температуры и внешнего поля, имеет ряд преимуществ в сравнении с традиционным магнитофазовым анализом. Во-первых, оценка фазового состава проводится в низких температурах, что делает метод пригодным для характеристики неравновесных сплавов. Идея реализации подобных оценок намечалась в работе [24], посвященной исследованию нанокристаллических лент, однако не была доведена до количественного результата. Во-вторых, при использовании данного метода необязательно знать объем либо массу ферромагнитного материала, что делает метод полезным при характеристике композитов, где определение массы либо

объема магнитной компоненты может быть затруднительным.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 11-03-00471-а, федеральной целевой программы “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009–2013 годы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Anaev B.A.* Фазовый магнитный анализ сплавов. М.: Металлургия, 1976. С. 132.
2. *Бозорт Р.* Ферромагнетизм. М.: Издательство иностранной литературы, 1956. С. 241.
3. *Hasegawa R., Ray R.* Iron-boron metallic glasses // *J. Appl. Phys.* 1978. V. 49. P. 4174.
4. *Hasegawa R., Ray R.* Magnetization of glassy Co–B alloys // *J. Appl. Phys.* 1979. V. 50. P. 1586.
5. *Varnakov S.N., Komogortsev S.V., Ovchinnikov S.G., Bartolome J., Sese J.* Magnetic properties and nonmagnetic phases formation in $(\text{Fe/Si})_n$ films // *J. Appl. Phys.* 2008. V. 104. P. 094703.
6. *Варнаков С.Н., Комогорцев С.В., Бартоломе Ж., Сесе Ж., Овчинников С.Г., Паршин А.С., Косырев Н.Н.* Изменение намагниченности мультислойных наноструктур Fe/Si в процессе синтеза и постростового нагрева // *ФММ.* 2008. Т. 106. № 1. С. 1–5.
7. *Smithells C.J.* Metals Reference Book, Butterworths, London, 1967. V. 2.
8. *Исхаков Р.С., Чеканова Л.А., Денисова Е.А.* Ширина линии ферромагнитного резонанса в высокодисперсных порошках сплавов Co–P, полученных в кристаллическом и аморфном состояниях // *ФТТ.* 1999. Т. 41. № 3. С. 464–467.
9. *Исхаков Р.С., Попов Г.В., Карпенко М.М.* Низкотемпературный ход намагниченности в аморфных и микрокристаллических Co–P сплавах // *ФММ.* 1983. Т. 56. № 1. С. 85–93.
10. *Игнатченко В.А., Исхаков Р.С., Попов Г.В.* Закон приближения намагниченности к насыщению в аморфных ферромагнетиках // *ЖЭТФ.* 1982. Т. 82. № 5. С. 1518–1531.
11. *Чеканова Л.А., Исхаков Р.С., Денисова Е.А.* Высокодисперсные порошки Co–P сплавов // *Материаловедение.* 2001. № 10. С. 30–34.
12. *Chekanova L.A., Denisova E.A., Iskhakov R.S.* Magnetic properties of electroless fine Co–P particles // *IEEE Trans. Magn.* 1997. V. 33. № 5. P. 3730–3732.
13. *Исхаков Р.С., Фиш Г.И., Мальцев В.К., Хлебопрос Р.Г.* Определение симметрии ближайшего окружения в аморфных сплавах Co–P // *ФММ.* 1984. Т. 58. № 6. С. 1214–1215.
14. *Грбчилов С.С.* Аморфные электролитически осажденные металлические сплавы. Минск: Издательский центр БГУ, 2006. 186 с.
15. *Huller K., Dietz G.* The temperature dependence of magnetization of Fe–P, Co–P and Ni–P alloys // *J. Magn. Magn. Mat.* 1985. V. 50. P. 250–264.
16. *Huller K., Dietz G., Hausmann R., Kolpin K.* The composition dependence of magnetization and Curie temperature of Fe–P, Co–P and Ni–P // *J. Magn. Magn. Mat.* 1985. V. 53. P. 103–110.

17. Чеканова Л.А., Исхаков Р.С., Фиш Г.И., Хлеб-прос Р.Г., Чистяков Н.С. Фазовый переход аморфное состояние—поликристалл в ферромагнитных Co—P пленках // Письма в ЖЭТФ. 1974. Т. 20. № 2. С. 73—76.
18. Saito T., Igarashi M., Kobayashi M. Magnetic properties of Co—P powders produced by chemical reduction // J. Appl. Phys. 2000. V. 88. № 12. P. 7209—7212.
19. Guihua Ch., Huading L., Hui Y., Suqing Ch. Preparation and Characterization of UltraFine Cobalt Powder // Rare Metal. Mat. Eng. 2010. V. 39. P. 207—210.
20. Gao J.Zh., Zhao Y.Ch., Tian J.N., Yang W., Guan F., Lu X.Q., Ma Y.J., Hou J.G., Kang J.W. Preparation of Ultrafine Cobalt Powder by Chemical Reduction in Aqueous Solution // Chinese Chem. Lett. 2001. V. 12. P. 555—558.
21. Исхаков Р.С., Кузовникова Л.А., Комогорцев С.В., Денисова Е.А., Балаев А.Д., Мальцев В.К., Бондаренко Г.Н. Ускорение процессов механосплавления взаимно нерастворимых металлов Co и Cu // ПЖТФ. 2004. Т. 30. № 2. С. 43—51.
22. Kitakami O., Sato H., Shimada Y. / Size effect on the crystal phase of cobalt fine particles / Phys. Rev. B. 1997. V. 56. P. 13849—13854.
23. Sato H., Kitakami O., Sakurai T., Shimada Y., Otani Y., Fukamichi K. Structure and magnetism of hcp-Co fine particles // J. Appl. Phys. 1997. V. 81. P. 1858—1862.
24. Guo H., Zaveta K., Shen B., Yang H., Kronmuller H. Low-temperature magnetization and spin-wave excitation in nanocrystalline ferromagnets // J. Phys.: Condens. Matter. 1993. V. 5. P. L437—L442.